

Fernando Paz Pellat  
Alma Velázquez Rodríguez  
Marlén Rojo Martínez  
Editores



Serie: Síntesis Nacionales

**Estado Actual  
del Conocimiento  
del Ciclo del Carbono  
y sus Interacciones en México:  
Síntesis a 2018**

Programa Mexicano del Carbono

Programa Mexicano del Carbono  
Instituto Tecnológico de Sonora



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL CONACYT



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA  
Educar para Trascender





**Forma correcta de citar:**

Paz, F., A. Velázquez y M. Rojo (Editores). 2018. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Instituto Tecnológico de Sonora. Texcoco, Estado de México, México. ISBN pendiente. 686 p.

ISBN: 978-607-96490-6-7



Programa Mexicano del Carbono A.C.  
Calle Chiconautla No. 8 Interior A  
Colonia Lomas de Cristo, Texcoco, Estado de México, México

---

[www.pmcarbono.org](http://www.pmcarbono.org)

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).  
Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

---

Diseño Gráfico: Oscar J. Velázquez R.

# Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018

---

Fernando Paz, Alma Velázquez y Marlén Rojo

---

EDITORES

Programa Mexicano del Carbono.  
Instituto Tecnológico de Sonora.

Álamos, Sonora

2018

ISBN: 978-607-96490-6-7

ISBN: 978-607-96490-6-7



9 786079 649067

# Índice de Revisores

**JAIME GARATUZA PAYÁN**

Instituto Tecnológico de Sonora

**BEN DE JONG**

El Colegio de la Frontera Sur

**ENRICO YÉPEZ GONZÁLEZ**

Instituto Tecnológico de Sonora

**FERNANDO PAZ PELLAT**

Colegio de Postgraduados

**GEORGINA SANDOVAL FABIÁN**

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.

**LUIS CALDERÓN AGUILERA**

Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada

**JORGE ALFREDO HERRERA SILVEIRA**

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Mérida, Instituto Politécnico Nacional

**JOSÉ RUBÉN LARA LARA**

Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada

**JULIO CÉSAR RODRÍGUEZ**

Universidad de Sonora

**MARCOS CASIANO DOMÍNGUEZ**

Programa Mexicano del Carbono

**MARGARET SKUTSCH**

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México

**MARIELA FUENTES PONCE**

Universidad Autónoma Metropolitana

**MARIO MANZANO CAMARILLO**

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

**OSCAR BRIONES VILLARREAL**

Instituto de Ecología, A.C.

**RAMÓN SOSA ÁVALOS**

Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Universidad de Colima





## **Prólogo**

El Programa Mexicano del Carbono se complace en presentar al público, como cada año desde su formación en 2005, la Síntesis Nacional del 2018, obra que conjunta el esfuerzo realizado por numerosos científicos, tanto nacionales como extranjeros, para impulsar la investigación y conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México.

Como ya es tradición, durante el Noveno Simposio Internacional del Carbono en México se presentaron más de 100 contribuciones en las diversas áreas temáticas que conforman el Comité Científico: Ecosistemas Terrestres, Ecosistemas Acuáticos, Atmósfera, Dimensión Social, Bioenergía y Sistemas Humanos. En esta ocasión, el evento tuvo lugar en la Ciudad de Álamos, Sonora, bajo el auspicio del Programa Mexicano del Carbono y el Instituto Tecnológico de Sonora. Los trabajos expuestos, todos de excelente calidad académica, se sometieron a la opinión de la comunidad científica, dando lugar a intensas jornadas de discusión, con una visión multidisciplinaria y multi institucional, siempre bajo una óptica de integración del conocimiento de las diferentes áreas sobre el Ciclo del Carbono y sus Interacciones.

Con una importante participación de jóvenes científicos y, teniendo como premisa el interés común, se discutieron los nuevos paradigmas de investigación sobre el Ciclo del Carbono y sus tecnologías de estudio, con la finalidad de continuar con la labor emprendida por sus mentores hace trece años, de desarrollar modelos y estrategias *ex profeso* para México, acordes con sus necesidades, su realidad política, económica, social y ambiental. Cada investigación aquí plasmada representa, por tanto, el esfuerzo de la comunidad científica por mejorar las condiciones del país.

Gracias por el interés y entusiasmo de este colectivo científico; esperamos que esta publicación sea un aliciente más para continuar en la consecución de las metas en tan relevante tema. Los esperamos en Nayarit 2019.

Fernando Paz Pellat

**Coordinador General**

**Programa Mexicano del Carbono**



# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1:</b>	<b>17</b>
<b>ATMÓSFERA</b>	
1.1 Emisiones de carbono provenientes de los principales dispositivos de cocción con leña en CBC	19
1.2 Intercambio neto del ecosistema en tres ecosistemas de la zona del monzón de Norteamérica	24
1.3 The role of green-lawns on urban CO <sub>2</sub> and water fluxes	30
1.4 Emisiones de GEI en suelos de bosques templados con manejo forestal	36
1.5 Productividad neta del agroecosistema en un cultivo de trigo de invierno en el Valle del Yaqui	41
1.6 Variación temporal de las emisiones de CO <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> O en respuesta al riego con agua residual	47
1.7 Variación estacional de los flujos de carbono y agua sobre la selva baja caducifolia Yucateca en la Reserva Estatal “El Palmar”	53
1.8 Productividad neta del ecosistema, sus componentes y evapotranspiración en un bosque tropical seco maduro en el Noroeste de México	61
1.9 Los agroecosistemas ¿funcionan como sumidero de carbono?	69
1.10 Climatic drivers of divergence in carbon and water fluxes in two adjacent Australian semi-arid ecosystems	77
1.11 Emisiones potenciales de GEI producidas por la quema de diferentes clases de combustibles forestales en el Estado de Jalisco	84
1.12 Flujos anuales de carbono en ecosistemas terrestres de México	90
1.13 Flujos de C entre dos ecosistemas contrastantes del Noroeste de México	100
1.14 Emisiones de metano de diferentes tipos de manglar en Yucatán	106
1.15 Biosphere 2 – landscape evolution observatory: Un experimento a gran escala	112
1.16 Medición de las emisiones de dióxido de carbono, óxido nitroso y metano en tepetates habilitados para uso agrícola	117

## CAPÍTULO 2: BIOENERGÍA 125

- 2.1 Disponibilidad de subproductos de la industria primaria de la madera para la generación de energía 127
- 2.2 Producción y caracterización de un coctel enzimático para la hidrólisis o tratamiento de bagazos para su uso como sustrato para biocombustibles y otras industrias 132
- 2.3 Índice de preferencia para el consumo de leña en Villaflores, Chiapas, México 137
- 2.4 Compostaje para disminuir toxinas en biocarbón 142

## CAPÍTULO 3: DIMENSIÓN SOCIAL 147

- 3.1 Resiliencia socio-ecológica ante la crisis del café en la Sierra Madre de Chiapas, México 149
- 3.2 Explaining the Mexican sink 156
- 3.3 La asignación eficiente de la biomasa: calidad ambiental *versus* bienestar material 163
- 3.4 Costos de oportunidad de los Sistemas de producción de café orgánico en la Sierra Madre de Chiapas, México 168

## CAPÍTULO 4: ECOSISTEMAS ACUÁTICOS 175

- 4.1 Limitada preservación de carbonato de calcio en una laguna costera tropical del Golfo de California 177
- 4.2 Tendencias de verdor y almacenes de carbono en los manglares de México 182
- 4.3 Análisis del cambio de uso de suelo del manglar de la barra San José, Chiapas, México 187
- 4.4 Almacenes de carbono en biomasa de pastos marinos costeros tropicales de regiones cársticas 193
- 4.5 Almacenes de carbono aéreo en manglares del caribe mexicano 200
- 4.6 Pérdida en los almacenes de carbono del ecosistema de manglar ocasionados por la construcción de una carretera 207



4.7	Carbono azul en manglares de la Laguna de Términos, Campeche	213
4.8	Almacenes y flujos de carbono en diferentes tipos ecológicos de manglares en Celestun, Yucatán	219
4.9	Efecto en el bentos de las granjas de engorda de atún en la Península de Baja California, México	226
4.10	Almacén y captura de carbono aéreo por <i>Rhizophora mangle</i> y <i>Avicennia germinans</i> en una zona de restauración ecológica	229
4.11	Variabilidad del sistema del CO <sub>2</sub> en el Parque Nacional Islas Marietas (PNIM), Bahía de Banderas, Nayarit	235
4.12	Estudio del sistema del dióxido de carbono en aguas de un sistema ostrícola	243
4.13	La pesca frente al cambio climático global	246
4.14	Constituyentes del sistema de carbono en una surgencia costera en el Golfo de California	253
4.15	Metanogénesis en los manglares áridos del Noreste de México mediante un balance isotópico de masas	259
4.16	Variación temporal de flujos de carbono, agua y energía en un manglar semiárido del sur de Sonora	266
4.17	Los cultivos de macroalgas como potenciales sumideros artificiales de carbono	273
4.18	Variabilidad temporal de biomasa de carbono de picoplancton en una estación costera de Baja California	280
4.19	Simulación del transporte de carbono orgánico particulado a la Laguna de Términos, Campeche	287
4.20	Distribución espacial y temporal del carbono inorgánico disuelto en la Plataforma de Yucatán	294
4.21	Evaluación de almacén de carbono aéreo de los manglares, en la zona centro de Laguna Madre, Tamaulipas	299
4.22	Flujos de nutrientes y metabolismo neto del estero Siuti (eurihalino, subtropical) en el Golfo de California	306
4.23	Base de datos del balance de nutrientes (C, N, P) en lagunas costeras de México	313
4.24	Sistema del CO <sub>2</sub> en Bahía de los Ángeles (B.C.) en condiciones de verano e invierno	320

4.25	Estudio comparativo del flujo de CO <sub>2</sub> océano-atmósfera frente al norte de Sinaloa	326
4.26	Flujos de CO <sub>2</sub> en un ambiente hipersalino influenciado por la presencia de tapetes microbianos	332
4.27	Influencia de la cuenca hidrográfica en las propiedades ópticas del agua, costa de Nayarit	338
4.28	Análisis de macroelementos de diferentes componentes edáficos asociados al carbono en manglares de Paraíso, Tabasco	344
4.29	Mediciones de variables del sistema del carbono para caracterizar las condiciones oceanográficas superficiales que sigue tiburón ballena en Bahía de los Ángeles 2017	349
4.30	Estado trófico de tres lagunas costeras subtropicales del Golfo de California	355
4.31	Producción primaria bruta en bosques submarinos de la región Bahía Todos Santos	361
4.32	El sistema del dióxido de carbono frente a Baja California en dos condiciones oceanográficas distintas	367
4.33	Carbono inorgánico disuelto en el Pacífico Sur Mexicano durante la temporada de tormentas tropicales y huracanes	374
4.34	Validación del algoritmo OC2 para LANDSAT 8 aplicado al Lago Cráter de Santa María del Oro, Nayarit	380
4.35	Variación temporal (2007-2016) de la producción primaria y biomasa del fitoplancton en una estación costera al sur de la Corriente de California	388
4.36	Biomasa de los macroinvertebrados bentónicos en tres lagos urbanos del Bosque de Chapultepec, México	393
4.37	Producción primaria nueva y regenerada en un lago oligotrófico profundo	400
4.38	Redes tróficas y flujo de carbono en dos lagos tropicales de alta montaña	406
4.39	Variación de la biomasa fitoplanctónica a lo largo del Río Usumacinta durante temporadas hidrológicas contrastantes	412
4.40	Tasas de producción primaria en las regiones de Coatzacoalcos y Perdido en el Golfo de México	419

# CAPÍTULO 5: ECOSISTEMAS TERRESTRES

425

5.1	Estimación del contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) en el municipio de El Llano, Aguascalientes	427
5.2	Influencia de la vegetación en las características de los Histosoles de tres comunidades de humedales	434
5.3	Variabilidad y ajuste de datos para el cálculo del contenido de carbono orgánico del suelo	440
5.4	Tasa de captura de carbono en ecosistemas forestales de <i>Pinus oocarpa</i> en la región Frailesca, Chiapas	446
5.5	Viabilidad de implementación de proyectos forestales de captura de carbono en Xilitla, San Luis Potosí, México	452
5.6	Papel del parque ecológico de la Ciudad de México como sumidero de carbono	458
5.7	Determinación de almacenes de carbono en suelos de áreas verdes urbanas en zonas áridas	465
5.8	Distribución de carbono en biomasa de quinua ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) y su aporte al suelo	472
5.9	Ecuaciones preliminares para estimar biomasa aérea en <i>Pinus oocarpa</i> en un bosque de Guerrero, México	477
5.10	Análisis espacio-temporal de la macrofauna edáfica en Calakmul, Campeche	484
5.11	Relación carbono: fósforo en suelos mexicanos - una revisión	492
5.12	Breeding drought resistance and heat tolerance to mitigate climatic change effects on crops	497
5.13	Modelo ecológico de predicción de carbono en pastizales de Chihuahua	503
5.14	Carbono orgánico en un suelo con cultivo de caña en el Estado de Morelos	508
5.15	Biomasa aérea y almacén de carbono en dos leguminosas y una cactácea del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México	513
5.16	Factores topográficos determinantes de la mortandad de árboles inducida por una helada severa en un bosque tropical seco	521
5.17	Estrategias de manejo en huertos frutales para incrementar la fijación y almacenamiento de CO <sub>2</sub>	529

5.18	Evaluación de la metodología de resinas de intercambio iónico para la cuantificación de flujos de nutrientes en ecosistemas naturales	535
5.19	Tracking avocado production in Michoacan, México - A twenty-years land use analysis	542
5.20	Cuantificación del carbono orgánico en los suelos de Quintana Roo	550
5.21	Representación de producción primaria en ecosistemas tropicales y semiáridos mediante el uso de indicadores fenológicos	555
5.22	Efecto de perturbaciones en almacenamiento de carbono en suelos de Villaflores, Chiapas, México	562
5.23	Carbono arbóreo aéreo almacenado en la zona de manejo forestal de Santiago Xiacuí, Oaxaca, México	571
5.24	Biomasa microbiana asociada al carbono en la selva baja caducifolia del Noroeste de México	577
5.25	Catálogo de especies de sombra en cafetales de la Sierra Madre de Chiapas	582
5.26	Composición florística y almacén de carbono en la biomasa aérea de dos asociaciones vegetales del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México	592
5.27	Relación biomasa y topografía: de cómo los patrones de biomasa forestal se relacionan con la topografía	601
5.28	El carbono del suelo como promotor de la anidación en lagartijas de alta montaña en el centro de México	608
5.29	Aboveground and belowground carbon in treated and untreated western juniper ( <i>Juniperus occidentalis</i> ) systems in Oregon	615
5.30	Necromasa en el bosque tropical seco tras el paso del Huracán Patricia	620
5.31	Protocolo operativo de espectroradiometría de campo para el seguimiento fenológico de la vegetación en selvas y matorrales	625
5.32	Carbono edáfico en Acrisoles transformados de pastizales a plantaciones de <i>Acacia mangium</i> en Tabasco, México	633
5.33	Comparación de índices de reverdecimiento para la estimación de productividad primaria bruta en un cultivo de trigo en el Valle del Yaqui	637
5.34	Biodiversidad y cobertura en cafetales bajo distinto manejo en la Sierra Madre de Chiapas	644



5.35	Avances y retos para la estimación de biomasa área y subterránea de matorrales y pastizales con base en ecuaciones alométricas	652
5.36	Almacenes de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros de la Sierra Madre de Chiapas	671
5.37	Almacén de carbono en encinos en un gradiente altitudinal en Jalisco, México	678





1

Atmósfera

## 1.2 Intercambio neto del ecosistema en tres ecosistemas de la zona del monzón de Norteamérica

**Pérez-Ruiz Elí R.**<sup>1,6</sup>; Vivoni Enrique R.<sup>1, 2</sup>; Adams David K.<sup>3</sup>; Rodríguez Julio C.<sup>4</sup> y Verduzco Vivian S.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, AZ, EUA 85287.

<sup>2</sup>School of Sustainable Engineering and the Built Environment, Arizona State University, Tempe, AZ, EUA 85287.

<sup>3</sup>Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Coyoacan, Ciudad Universitaria, Cd. Universitaria, 04510 Ciudad de México, CDMX, México.

<sup>4</sup>Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora, Carr. Bahía Kino Km. 21, Apdo. Postal 305, Hermosillo, Sonora, México.

<sup>5</sup>Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero 818 Sur, Col. Centro, CP 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México.

<sup>6</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro no. 450 Nte., Col. Partido Romero, CP 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Autor para correspondencia: eli.perez@asu.edu

### Resumen

El monzón de Norteamérica se caracteriza por un cambio drástico en las condiciones meteorológicas y los flujos de materia y energía entre la superficie y la atmósfera debido a un incremento sustancial de precipitación en el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos. Para cuantificar los flujos de carbono, o Intercambio Neto del Ecosistema (NEE), durante la evolución del monzón, se estableció una red densa de sensores en la zona central de Sonora, México de Mayo a Octubre de 2017 como parte del experimento Red GPS-Hidrometeorológico del Monzón 2017. El área de estudio fue delimitada por tres torres micrometeorológicas equipadas con sistema de covarianza de vórtices (Eddy Covariance), sistemas GPS-meteorológico y otras mediciones relevantes de temperatura, humedad relativa y precipitación. Las torres se localizaron en un matorral subtropical (~650 msnm), un bosque de mezquites (~700 msnm) y un bosque de encino (~1400 msnm) en una forma triangular con distancias de aproximadamente 30 km entre cada torre. Los datos recabados fueron procesados de acuerdo con los estándares de la comunidad internacional de flujos. Se presentan resultados preliminares de la transición en los flujos de carbono al comienzo del monzón, la evolución en periodos secos y los cambios al finalizar la temporada de lluvias. El entendimiento de los flujos carbono es fundamental para determinar la respuesta de los ecosistemas a la variabilidad del monzón de Norteamérica, así como los cambios en las condiciones de la superficie.

**Palabras clave:** *covarianza de vórtices; flujos de carbono; matorral subtropical; bosque de mezquites; bosque de encino.*

### Abstract

The North American monsoon is characterized by a drastic change in meteorological conditions and fluxes of energy and matter between the Surface and the atmosphere due to a substantial increase in precipitation in the Northwest of Mexico and Southwest of the US. To quantify the carbon fluxes, or Net Ecosystem Exchange (NEE), during the evolution of the monsoon, a dense sensors network was deployed in the central zone of Sonora, Mexico from May to October 2017 as part of the experiment GPS-Hydrometeorological of the Monsoon 2017. The study area was delimited by three micrometeorological towers equipped with an Eddy Covariance (EC) system, GPS-meteorological systems and additional measurements of temperature, relative humidity and precipitation. The towers were located in a sub-tropical scrubland (~650 masl), a mesquite forest (~700 masl) and a oak forest

(~1400 masl) in a triangular shape with average distance of 30 km between each tower. Data obtained was processed according to the standards of the international flux community. Preliminary results of the transition of carbon fluxes at the beginning of the monsoon, the evolution of dry period and changes at the end of the rain season are presented. The understanding of the carbon fluxes is key to determine the response of ecosystems to the variability of the North American monsoon as well as the shifts in the land surface conditions.

**Key words:** *eddy covariance; carbon fluxes; sub-tropical scrubland; mesquite forest; oak forest.*

## Introducción

El Monzón de Norteamérica se caracteriza por un incremento pronunciado de la precipitación durante los meses de Julio a Septiembre, precedido por un periodo seco durante los meses de Abril a Junio (Adams y Comrie, 1997). Dicho fenómeno conlleva un incremento sustancial en la actividad biológica de los ecosistemas, causando un impacto considerable en las condiciones de la superficie, modificando los flujos de carbono, agua y energía entre la superficie y la atmósfera, principalmente por la disponibilidad sincronizada de agua (precipitación y humedad de suelo) y radiación solar (Méndez-Barroso y Vivoni, 2010; Perez-Ruiz *et al*, 2010; Forzieri *et al*, 2011; Méndez-Barroso *et al*, 2014; Verduzco *et al*, 2015; Verduzco *et al*, 2018).

El conocimiento de los procesos ecosistémicos que regulan el ciclo de carbono y la dinámica de la vegetación en la zona del monzón de Norteamérica son escasos (Forzieri *et al*, 2011; Verduzco *et al*, 2018). El Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) depende en gran medida de la variabilidad anual y estacional de la precipitación, principalmente por la estrecha relación entre la disponibilidad de agua y la actividad biológica de los ecosistemas (Verduzco *et al*, 2015).

En este trabajo se presentan resultados preliminares de flujos de carbono en tres ecosistemas de la zona del Monzón de Norteamérica.

## Materiales y Métodos

Una densa red de sensores meteorológicos se instaló en el área núcleo del Monzón de Norteamérica, en la zona centro-norte del estado de Sonora, México, como parte del experimento Red GPS-Hidrometeorológico 2017 (Figura 1), incluyendo como parte central, tres sistemas de correlación turbulenta (Eddy Covariance, EC) (Baldocchi *et al.*, 2001; Baldocchi, 2003) para la medición de flujos de carbono (Intercambio Neto del Ecosistema, NEE) (Cuadro 1).

Los sistemas EC fueron instalados en tres ecosistemas típicos de la zona:

- Un bosque de mezquite cerca de la localidad de Opodepe, a aproximadamente 690 msnm.
- Un bosque de Encino en Sierra Los Locos, a aproximadamente 1350 msnm.
- Un matorral subtropical cerca de la localidad de Rayón, a aproximadamente 630 msnm.

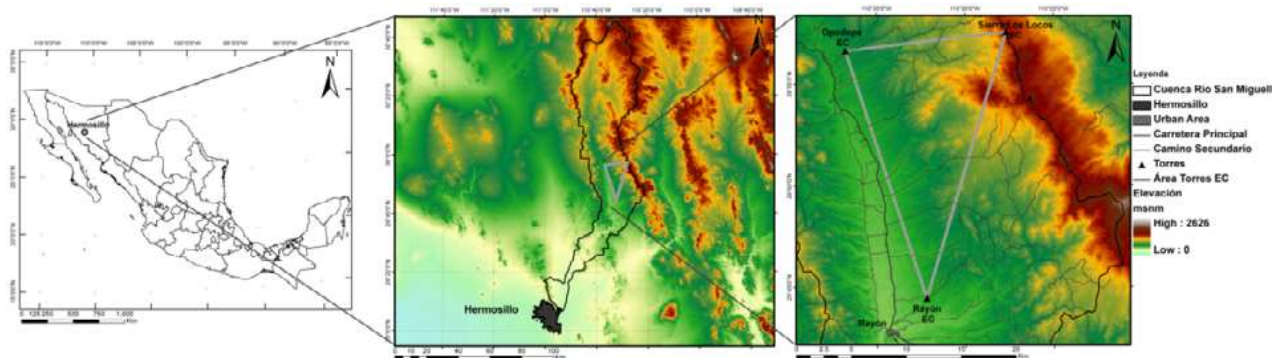


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio delimitada por un área triangular formada por los tres sistemas de covarianza de vórtices.

Cuadro 1. Instrumentos utilizados en cada sistema de covarianza de vórtices.

Sitio	Analizador de Gases	Anemómetro Sónico 3-D	Frecuencia
Opodepe	LI-7500	CSAT-3	10 Hz
Sierra Los Locos	LI-7500RS	Gill Windmaster Pro	20 Hz
Rayón	LI-7500	CSAT-3	20 Hz

El periodo de muestreo correspondió del 29 de Mayo al 9 de Octubre de 2017. Sensores de temperatura de aire, humedad relativa, radiación neta, humedad y temperatura de suelo y precipitación complementaron las mediciones de flujos. Valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) fueron obtenidos por medio de MODIS Global Subsets Tool (<https://modis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/global/subset.pl>) para el pixel de 250-m donde se encontraba cada torre. Durante el periodo de muestreo, el sitio Opodepe dejó de funcionar los días del año 203 al 225.

Los flujos fueron procesados utilizando la configuración básica del software EddyPro versión 6.2.0, y filtrados utilizando un criterio de  $u^*$  de 0.15 m/s y límites máximos y mínimos de flujos ( $LE = \min - 50 \text{ W/m}^2$  y  $\max 450 \text{ W/m}^2$ ,  $H = \min 200 \text{ W/m}^2$  y  $\max 800 \text{ W/m}^2$ , y  $NEE = \pm 3 \text{ mg/m}^2 \text{ s}$ ). Un llenado de huecos (Gap Filling) fue realizado usando la Online Gap Filling and Flux Partitioning Tool basada en el método estandarizado de Reichstein *et al* (2005) (<https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWeb>).

## Resultados y Discusión

La Figura 2 muestra los valores diarios de NEE, valores diarios de precipitación y valores de compuestos de NDVI de 8 días para cada uno de los sitios. En cada uno de los sitios se pueden apreciar claramente las condiciones previas, durante y después del monzón. Previo al monzón, los tres sitios presentan valores de NEE cercanos a cero y valores bajos de NDVI (alrededor de 0.2), sin embargo, ligeros valores negativos de NEE (captura) se pueden observar en Opodepe (mesquite) y Sierra los locos (encino), indicando algo de actividad biológica previo al monzón. Con la llegada del monzón, la cual vario en temporal e intensidad, vemos un incremento sustancial en los valores positivos de NEE, indicando una emisión considerable de  $\text{CO}_2$  con la llegada de las lluvias. De igual manera, la magnitud y duración de este pulso de valores positivos de NEE vario de sitio en sitio.

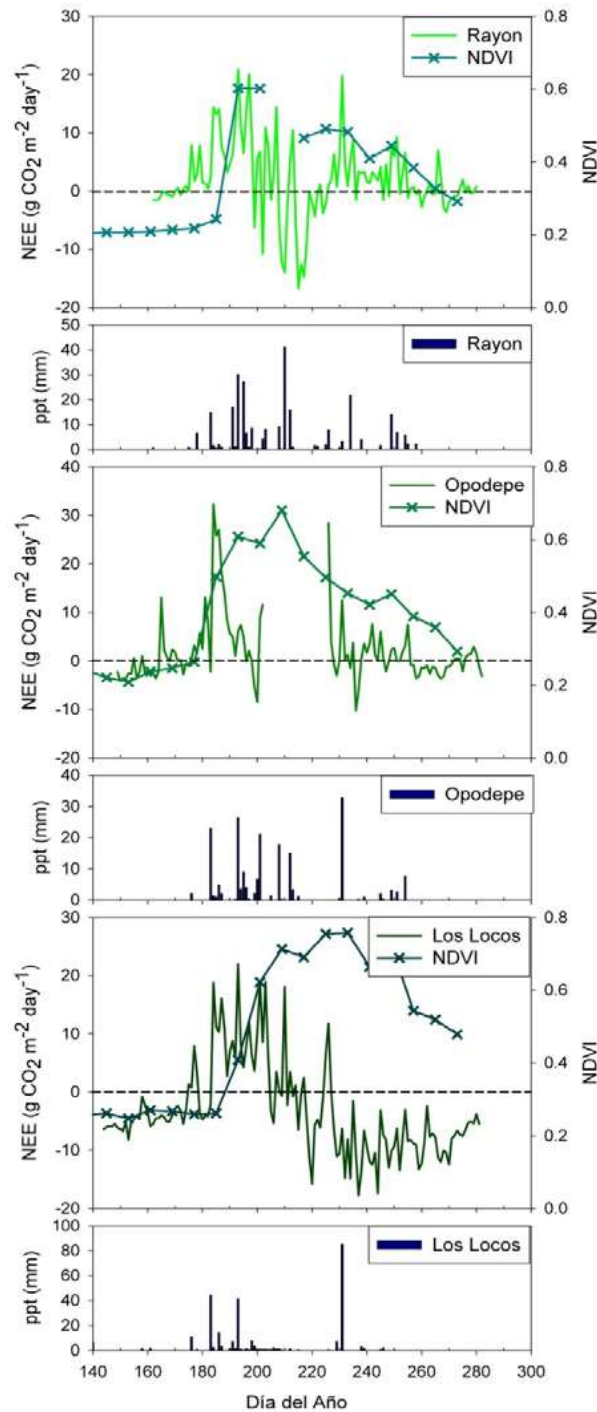


Figure 2. Valores diarios de NEE y precipitación, y valores compuestos de NDVI de cada 8 días para cada sistema de covarianza de vórtices.

El periodo posterior al inicio del monzón mostro características distintas en cada sitio. En el caso de Rayón (matorral subtropical), un periodo de valores negativos de NEE (captura) comienza después de un reverdecimiento súbito de la vegetación ( $NDVI = 0.6$ ) alrededor del día 200 hasta aproximadamente el día 230. El resto del monzón, a pesar de tener valores considerables de NDVI, los flujos permanecieron negativos. En el caso de Opodepe (mesquite), el pulso positivo es más corto que en Rayón y, a pesar de la falta de datos, podemos ver un comportamiento similar al de Rayón, con flujos

positivos o alrededor de cero después de aproximadamente el día 230, a pesar de mantenerse valores elevados de NDVI. Por algún motivo, pareciera que el periodo de captura o valores negativos de NEE no correspondió en extensión al periodo de reverdecimiento de la vegetación. Sierra Los Locos mostró un periodo de emisión (NEE positivo) más amplio, comenzando aproximadamente el día 190 y terminando el día 210, mientras que el periodo de captura se extendió hasta el final del periodo de monitoreo.

Para ejemplificar mejor las diferencias y similitudes en los sitios, la Figura 3 muestra las curvas diurnas promedio de NEE para cada mes. En todos los casos, los máximos flujos diurnos correspondieron a agosto, sin embargo, la evolución del resto de los meses fue distinta. Si bien durante todos los meses hubo flujos negativos alrededor de mediodía, Sierra Los Locos mostro valores de captura más grandes, con máximos durante agosto y septiembre. En el caso de Rayón los valores máximos de captura fueron los meses de julio y agosto, mientras que en Opodepe los máximos fueron en agosto. En todos los casos, el aumento en los flujos de captura durante el día se correspondió con máximos flujos negativos (emisión) durante la noche.

La sucesión de ciclos diurnos más amplios o más cortos se corresponde con la duración de los periodos de emisión y captura mencionados en el análisis de la Figura 2. De igual manera, en todos los casos hay una disminución de los flujos, con valores alrededor de cero, con el término de la temporada del monzón.

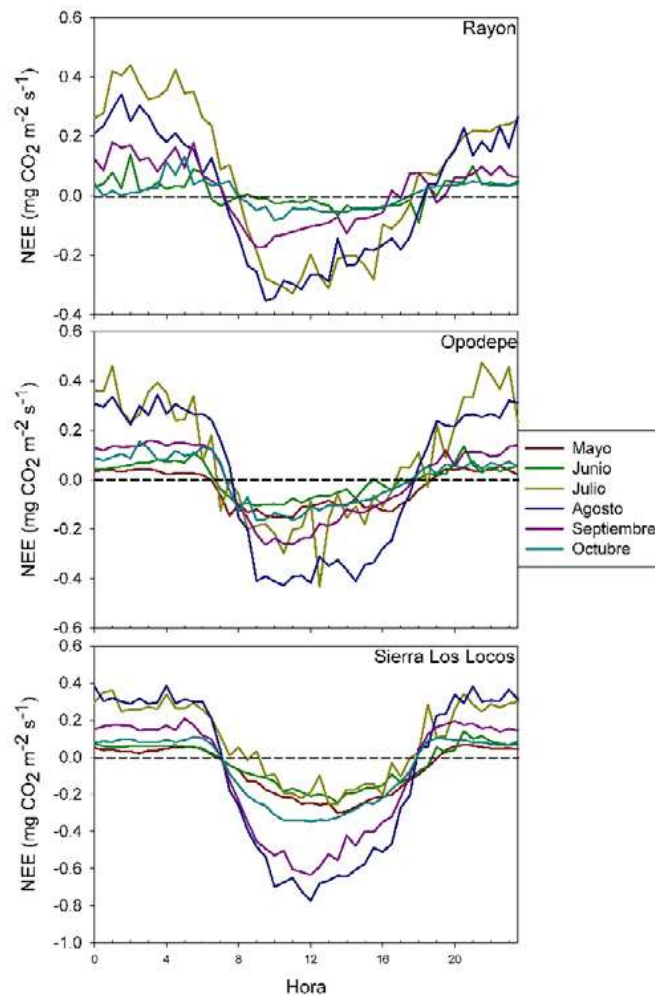


Figura 3. Flujos diurnos promedio mensuales de NEE para los tres sitios de estudio.



## Conclusiones

Se obtuvo el Intercambio Neto del Ecosistema en tres diferentes ecosistemas durante el monzón de Norteamérica en el verano de 2017. Los tres ecosistemas mostraron cuatro etapas típicas de respuesta al monzón, con diferencias en magnitud y temporalidad: 1) un pre-monzón, con flujos alrededor de cero (Rayón) y ligeramente negativos (Opodepe y Sierra Los Locos); 2) inicio del monzón, con un aumento súbito en valores positivos de NEE (emisión), que varió en amplitud y temporalidad; 3) un periodo de captura coincidente con el máximo reverdecimiento, que varió en amplitud y temporalidad, y que no necesariamente coincidió en extensión al periodo de reverdecimiento; y 4) un post-monzón, con flujos volviendo a valores alrededor de cero, arribando antes de la senescencia en Rayón y Opodepe, y extendiendo hasta el fin del periodo de estudio en Sierra Los Locos. Existe una gran variabilidad en la respuesta de la actividad biológica de los ecosistemas en función de la variabilidad en la magnitud, temporalidad y amplitud de las precipitaciones en la zona del monzón de Norteamérica.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a todos los participantes del experimento Red GPS-Hidrometeorológico del Monzón de Norteamérica 2017 por su valioso apoyo en la realización de la campaña de investigación de verano. E.R.P.R agradece al Programa de Desarrollo Profesional Docente Tipo Superior, SES-SEP, y al programa Fulbright-García Robles (Grantee ID: 15160092) por el apoyo para realizar estudios de doctorado.

## Literatura citada

- Adams, D. K. and A. C. Comrie. 1997. The north American monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78:2197-2213.
- Baldocchi, D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, Ch. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Paw U., K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson and S. Wofsy. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82:2415-2434 doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2.
- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global change biology* 9:479-492.
- Forzieri, G., F. Castelli and E. R. Vivoni. 2011. Vegetation dynamics within the North American monsoon region. *Journal of Climate* 24:1763-1783.
- Méndez-Barroso, L. A. and E. R. Vivoni. 2010. Observed shifts in land surface conditions during the North American Monsoon: Implications for a vegetation-rainfall feedback mechanism. *Journal of Arid Environments* 74: 549-555.
- Méndez-Barroso, L. A., E. R. Vivoni, A. Robles-Morua, G. Mascaro, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, C. J. Watts, J. Garatuza-Payán and J. A. Saíz-Hernández. 2014. A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico. *Water Resources Research* 50:3229-3252 doi.org/10.1002/2013WR014838.
- Perez-Ruiz, E. R., J. Garatuza-Payan, C. J. Watts, J. C. Rodriguez, E. A. Yépez and R. L. Scott. 2010. Carbon dioxide and water vapour exchange in a tropical dry forest as influenced by the North American Monsoon System (NAMS). *Journal of Arid Environments* 74:556-563.
- Reichstein, M., E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grünwald, K. Havránková, H. Ilvesniemi, D. Janous, A. Knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J. M. Ourcival, J. Pumpanen, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir and R. Valentini. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11:1424-1439 doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x.
- Verduzco, V. S., J. Garatuza-Payán, E. A. Yépez, C. J. Watts, J. C. Rodríguez, A. Robles-Morua and E. R. Vivoni. 2015. Variations of net ecosystem production due to seasonal precipitation differences in a tropical dry forest of northwest Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120:2081-2094.
- Verduzco, V. S., E. R. Vivoni, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, C. J. Watts, T. Tarin, J. Garatuza-Payán, A. Robles-Morua and V. Y. Ivanov. 2018. Climate Change Impacts on Net Ecosystem Productivity in a Subtropical Shrubland of Northwestern México. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 123: 688-711 doi.org/10.1002/2017JG004361.